



УДК 621.313.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫХОДА ШИМ КАК ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ USING PWM OUTPUT AS A DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER

Плотников Юрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Уймин Юрий Сергеевич, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yura20legend@yandex.ru, Тел.: +7(912)699-88-12

Iurii V. Plotnikov, candidate of technical sciences, associate professor, department of « Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Iurii S. Uimin, Master student, Department « Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yura20legend@yandex.ru. Ph.: +7(912)699-88-12

Аннотация: В статье рассматривается способ использования встроенных каналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на микропроцессоре TMS320F28335 в качестве цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Статья содержит методику фильтрации высокочастотных сигналов ШИМ, которая позволяет выделить полезную составляющую сигнала. Представлены теоретические и экспериментальные результаты для оценки качества фильтрации.

Abstract: This article presents a method for utilizing the on-chip pulse width modulated (PWM) channels on the TMS320F28335 microprocessor as a digital-to-analog converter (DAC). The article contains a technique for filtering high-frequency analog PWM signals, leaving only low-frequency components. Theoretical and experimental results are presented for the quantitative evaluation of the achieved result.

Ключевые слова: Контроллер TI F2833; ШИМ, АЦП, фильтр нижних частот

Key words: TI F2833 Controller; PWM, DAC, low-pass filter

ВВЕДЕНИЕ

Двигатели, управляемые посредством микроконтроллеров и цифровых сигнальных процессоров, позволяют достичь большей гибкости, надежности, а самое главное дешевизны итоговой производственной системы. Такие системы активно внедряются последнее время и имеют огромные перспективы развития [1].

Создание системы управления на базе микропроцессоров требует достаточно длительной разработки и отладки. Во время разработки программного обеспечения для микропроцессоров часто возникает необходимость посмотреть осциллограммы внутренних переменных. Конечно, существует возможность посмотреть работу переменной непосредственно во встроенном отладчике в среде программирования или смоделировать систему, например, в пакете MATLAB. Однако в этих способах существуют

некоторые недостатки такие как: невозможность посмотреть быстро изменяющийся сигнал в среде программирования, или, если используется MATLAB, моделирование всей системы может занять значительное время. Поэтому во время отладки программы возникает необходимость в отображении внутренних переменных на экране внешнего осциллографа.

Из метода гармонического анализа Фурье известно, что любую периодическую функцию можно представить в виде большого (бесконечного) числа синусоидальных гармоник, кратных основной частоте [2]. Таким образом, задав сигнал ШИМ, изменяющийся в функции определенной внутренней переменной, а в последствии подавив высокочастотные составляющие, можно вывести на экран осциллографа переменную, в функции которой изменятся скажность сигнала ШИМ.

ВЫБОР ТИПА ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

Использование выхода ШИМ в качестве ЦАП может рассматриваться как более дешевая альтернатива по сравнению с внесхемными решениями, которые во многих случаях не реализованы на процессорных платах [4].

Для решения такой задачи необходимо использовать фильтр нижних частот (ФНЧ), чтобы подавить высокочастотную составляющую предварительно сформированного сигнала ШИМ. Полоса пропускания фильтра будет определять полосу пропускания ЦАП. Таким образом, задача состоит в том, чтобы правильно задать сигнал ШИМ и подобрать фильтр. Идеальный ФНЧ, имеющий прямоугольную АЧХ и может полностью подавить все требуемые высокочастотные гармоники, оставив только полезную составляющую сигнала. Однако невозможно построить идеальный фильтр, а реальный фильтр всегда пропустит некоторую часть гармоник, что приводит к возникновению пульсаций выходного сигнала, как схематично показано на рисунке 1 [4].

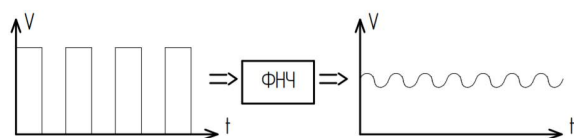


Рис. 1. Аналоговая фильтрация сигнала ШИМ

Внешний вид отфильтрованного сигнала зависит от правильного выбора ФНЧ. Существуют как активные (построенные на операционных усилителях), так и пассивные (построенные на резисторах, конденсаторах и емкостях) фильтры. Оба вида ФНЧ имеют свои достоинства и недостатки, однако неоспоримым плюсом пассивного фильтра является невысокая стоимость и простота построения. Именно его выбирают для задач визуализации.

При выборе фильтров необходимо учитывать ряд факторов таких как: ширина полосы пропускания и наклон частотной характеристики. Полоса пропускания представляет собой диапазон частот, которые фильтр может пропускать без искажений сигнала по амплитуде. Частота среза фильтра — это величина, при которой амплитуда частотной характеристика фильтра равна 0,707 (т. е. -3 дБ). Полоса пропускания фильтра напрямую связана с максимальной частотой сигнала, которую необходимо будет эффективно обрабатывать. Наклон частотной характеристики определяет величину гармонических пульсаций, которые будут видны на выходе фильтра.

На практике наиболее широкое распространение получили пассивные фильтры первого и второго порядков (для фильтра 1-го порядка наклон

составляет -20 дБ на декаду, для фильтра 2-го порядка -40 дБ на декаду и т. д.) [4].

Принципиальные электрические схемы пассивных фильтров первого и второго порядка представлены на Рис. 2.

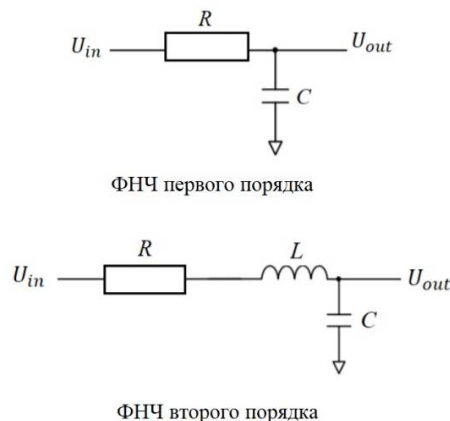


Рис. 2. Принципиальные электрические схемы ФНЧ 1-го и 2-го порядков

Передаточная функция фильтра первого порядка имеет вид:

$$W_1(p) = \frac{V_{out}(p)}{V_{in}(p)} = \frac{1}{\tau p + 1} = \frac{1}{R \cdot C + 1}, \quad (1)$$

где τ — постоянная времени фильтра, а R и C значения сопротивления и емкости. Частота среза фильтра 1-го порядка, таким образом, составляет:

$$f = \frac{1}{\tau}, \quad (2)$$

Такой фильтр имеет один существенный недостаток. Крутизна спада в полосе подавления составляет всего лишь 20 дБ/декаду, то есть фильтр 1-го порядка не обеспечивает характеристик, необходимых при построении ЦАП с использованием ШИМ. Однако, для задач визуализации такой фильтр является наиболее удобным и простым решением.

Передаточная функция фильтра второго порядка имеет вид:

$$W_2(p) = \frac{V_{out}(p)}{V_{in}(p)} = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\zeta\omega_n p + \omega_n^2}, \quad (3)$$

где ω_n — собственная частота незатухающих колебаний фильтра, а ζ — безразмерный коэффициент затухания. Частота среза фильтра 2-го порядка, которая определяет его полосу пропускания, рассчитывается по выражению:

$$f = \omega_n \sqrt{\left[(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2} \right]}, \quad (4)$$

Очевидно, что фильтр 2-го порядка имеет более сложную математическую модель. Фильтры 2-го и более высоких порядков используются для цифро-аналогового преобразования в задачах последующего использования этого сигнала, когда принципиально важна его точность и разрядность ЦАП. Также целесообразно использовать такие

фильтры для сигналов большой частоты, порядка сотен тысяч килогерц.

Одной из важных характеристик фильтра является его реакция на ступенчатое входное воздействие. С точки зрения времени нарастания отклика на ступенчатое воздействие, желательно иметь как можно меньший минимальное время нарастания сигнала. Однако, для фильтров второго порядка, при малых коэффициентах затухания при ступенчатом входном воздействии имеют место большие значения перерегулирования и колебательный характер переходного процесса. Наименьший коэффициент затухания, при котором величина перерегулирования имеет приемлемые значения, равен $\zeta = 1$ [4]. Также желательно избежать наличия резонансного пика в АЧХ фильтра. Минимальный коэффициент затухания, при котором отсутствует резонансный пик, составляет $\zeta = 0,707$. Выбор коэффициента затухания зависит от конкретных требований к системе. Часто разумным компромиссом является выбор коэффициента затухания фильтра в диапазоне от 0,707 до 1,0. При значении коэффициента затухания равном 0,707 полоса пропускания в уравнении (4) равна ω_n .

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ФНЧ

Для выбора фильтра, будем использовать программный пакет MATLAB, а именно в приложение Simulink, которое содержит специальный раздел Simscape, позволяющий моделировать физические объекты, в том числе – электрические схемы. Поскольку ставится задача визуализации переменных с частотой изменения порядка 50 Гц, то целесообразным будет использование ФНЧ 1-го порядка. Схема моделирования представлена на рисунке 3.

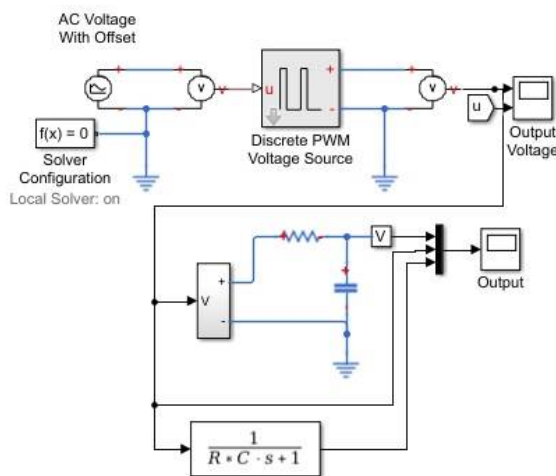


Рис. 3. Схема моделирования в Simulink

Модель фильтра выполнена как на элементах библиотеки Simscape, так и через передаточную функцию, описанную выражением (1).

Сначала необходимо выбрать порядок фильтра и параметры его компонентов. Важно выбирать фильтр, чтобы при рабочих частотах сигналов около 50 Гц, был наименьший сдвиг по фазе, и минимальное изменение амплитуды полезного сигнала. Исходя из этих требований выбираем следующие параметры фильтра: $f = 1120$ Гц, $R = 6,8$ кОм, $C = 19,19$ нФ. На рисунке 4 показаны его частотные характеристики.

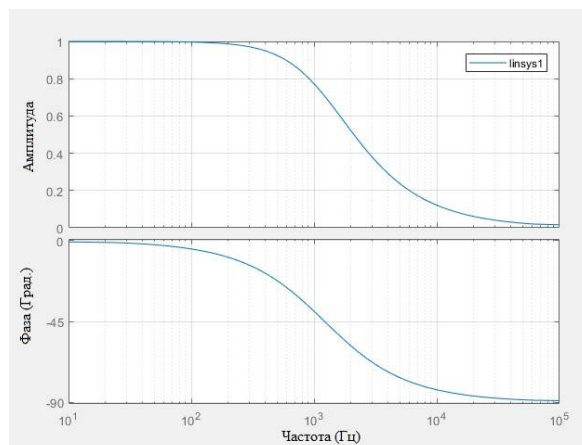


Рис. 4. Частотные характеристики фильтра

На частоте 50 Гц сдвиг по фазе составляет всего $2,35^\circ$, а изменение амплитуды около 0,1 %. Таким образом, исходный сигнал будет иметь небольшое запаздывание и минимальное искажение амплитуды. Подадим на генератор цифровой симметричной ШИМ синусоиду (напряжение U_a в скалярной системе управления), а также отобразим пилообразный сигнал (угол θ необходимый для процедуры преобразования координат). Результаты моделирования представлены на рисунках 5 и 6 (частота ШИМ 750 кГц).

Результаты моделирования показывают, что сигнал обрабатывается точно и математическое моделирование сходится с моделированием электрической схемы.

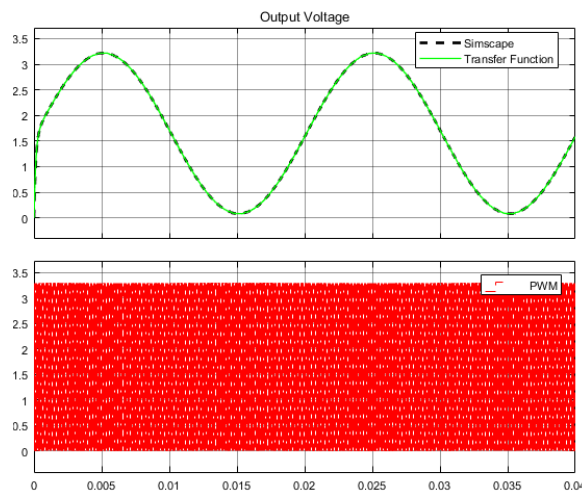


Рис. 5. Результат работы ФНЧ - сигнал U_a

Рис. 6. Результат работы ФНЧ – сигнал θ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ФНЧ

Для экспериментального анализа будем использовать скалярную систему управления электроприводом на базе микропроцессора TMS320F28335, выполненную в среде программирования Code Composer Studio. Схема подключения ФНЧ к отладочной плате MChip176-28335 показана на рисунке 7.

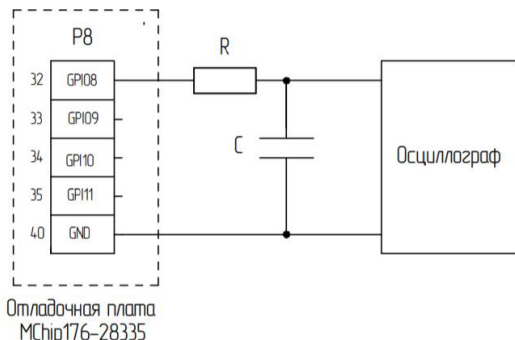
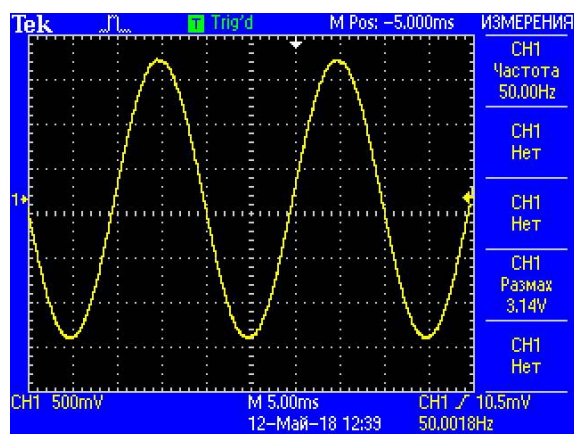
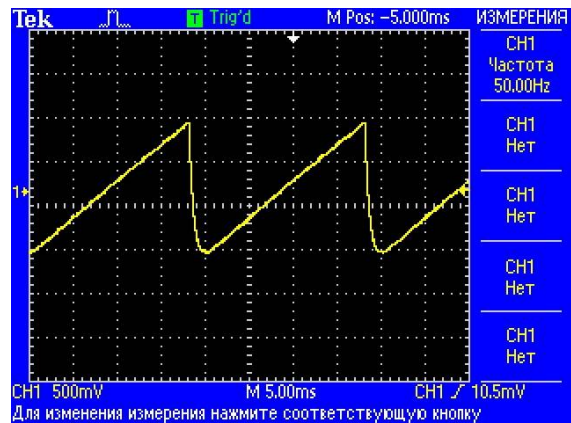


Рис. 7. Схема подключения фильтра к отладочной плате

Результат вывода переменных U_α и θ на экран осциллографа показаны на рисунках 8 и 9.

Рис. 8. Результат работы ФНЧ – U_α Рис. 9. Результат работы ФНЧ – θ

Видно, что все результаты моделирования сходятся с результатами эксперимента, что говорит о возможности использования выхода ШИМ с фильтрацией для отображения переменных на экране внешнего осциллографа.

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАНАЛОВ ЦАП И АЦП

Заключительным экспериментом будет являться использование канала ШИМ в качестве ЦАП, сигналы от которого подаются на встроенный аналогового-цифровой преобразователь (АЦП), разводка для которого имеется на отладочной плате MChip176-28335. Схема эксперимента приведена на рисунке 10.

Такой эксперимент позволяет проверить корректность работы канала ШИМ в качестве АЦП без использования внешнего осциллографа.

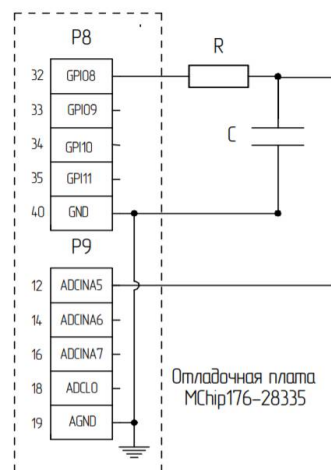


Рис. 10. Схема подключения фильтра к отладочной плате

Оцифрованный сигнал с ЦАП будем сравнивать переменной, которую подается на канал ШИМ для вывода на внешний осциллограф.

Идея эксперимента состоит в том, чтобы правильно обработать сигнал, полученный АЦП с

фильтра нижних частот. В итоге, сравнив сигнал АЦП, с работой внутренней переменной непосредственно в среде программирования Code Composer Studio можно сделать вывод о корректности работы канала ШИМ с фильтром в качестве АЦП.

Сигнал U_α изменяется от $-U_{max}$ до $+U_{max}$, где $U_{max} = 0,95$ – максимальное напряжение на кривой зависимости U/f в скалярной системе управления [5].

Однако, как видно из осциллограмм и результатов моделирования в MATLAB, отфильтрованные сигналы изменяются только в положительной области, поэтому требуется правильно обработать сигнал АЦП, чтобы он изменялся по необходимому закону [6].

АЦП работает так, что сравнивает напряжение аналогового сигнала с базисным напряжением АЦП и их разницу выдает в определенный бит, соответствующий входу АЦП, в процессорных единицах. В случае использования микропроцессоров TI серии C2000, АЦП сравнивает сигнал с напряжением на входе ADCLO на отладочной плате, таким образом, если соединить этот вход с «землей», то в бит будет записываться именно напряжение, которое подается на АЦП. Подробнее это описывается следующей формулой (при $0 \leq U_{вх} \leq 3,3$) [6]:

$$\text{Результат} = X \cdot \frac{U_{вх} - U_{ADCLO}}{3}, \quad (5)$$

где X определяется как 2 в степени разрядности АЦП.

Таким образом, правильно обработав сигнал с АЦП и, изобразив его с внутренней переменной, подаваемой на ФНЧ, в одних осях делается вывод о корректности настройки АЦП, работы фильтра, и в целом, эксперимента.

На рисунке 11 представлены результаты эксперимента.

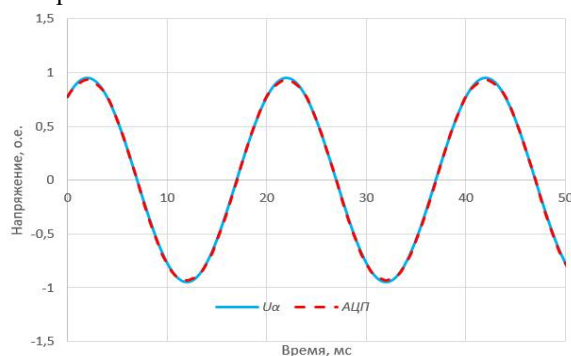


Рис. 11. Результат эксперимента

Результаты совместного использования ФНЧ и АЦП показывают, что фильтр подобран достаточно точно, а также, что сигнал с выхода ЦАП обрабатывается корректно и погрешность не превышает доли процентов.

Таким образом, можно сделать вывод, что при отсутствии осциллографа при наладке программ, можно использовать встроенный АЦП, как осциллограф, однако при работе в среде программирования Code Composer Studio существует те минусы, о которых было сказано в начале, а именно – невозможность выводить сигнал, изменяющийся достаточно быстро, поэтому приходится замедлять программу, что создает некоторые неудобства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были представлены теоретические данные по использованию канала ШИМ в качестве ЦАП. Была составлена модель фильтра в программном пакете MATLAB, результат работы которой подтверждается экспериментом с реальным осциллографом. Был проведен эксперимент по совместному использованию АЦП и ЦАП, где процессы визуализировались непосредственно в среде программирования.

Результаты работы показывают возможность использования простого фильтра первого порядка для фильтрации сигнала канала ШИМ, который используется в качестве цифро-аналогового преобразователя. Полоса пропускания фильтра оказывается достаточной для его использования во время отладки систем автоматического управления и отображения внутренних переменных на экране внешнего осциллографа в реальном масштабе времени.

Однако, если стоит задача обработки сигналов в сотни тысяч килогерц Texas Instruments предлагает специальный модуль ШИМ высокого разрешения (HRPWM) [3], который позволяет без искажения представить цифровой сигнал ШИМ большой частоты как аналоговый.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Masahito Otsuki, Manabu Watanabe and Akira Nishiura, Trends and Opportunities in Intelligent Power Modules (IPM)// Proceedings of the IEEE, 2015
2. Hildebrand F.B. «Advanced Calculus for Applications», PrenticeHall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 2nd edition, 1976, ISBN 0-13-011189-9.
3. TMS320x28xx, 28xxx High-Resolution Pulse Width Modulator (HRPWM) Reference Guide Texas Instruments Inc. (SPRU924).
4. Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller. Application Report (SPRAA88A)
5. Texas Instruments. Scalar (V/f) Control of 3-Phase Induction Motors. Application Report. Literature Number: SPRABQ8–July 2013. 25 p.
6. TMS320x2833x Analog-to-Digital Converter (ADC) Module. Reference Guide Texas Instruments Inc. (SPRU812A).